

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19920061151833

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

高速数控非球面加工技术研究

Research on High Speed NC Processing Technology of
Aspheric Surface

杨清全

指导教师姓名: 郭隐彪教授

专 业 名 称: 机械设计制造及其自动化

论文提交日期: 2009 年 5 月

论文答辩时间: 2009 年 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

随着国防工业、航空、民用光学技术的发展,各种高精度的非球面光学元件越来越多地应用于高性能要求的光学系统中。非球面光学元件具有矫正像差、简化系统、提高光学系统精度等优点。当前,光学非球面器件的使用主要受到其加工精度、表面质量和制造成本的限制。单点金刚石超精密车削加工技术以其高表面质量、低制造成本成为超精密加工光学元件的热点。

由于工件与刀具相对运动形式决定了非球面的加工精度,本文针对光学非球面的加工机理,提出改善加工效率、提高加工精度的加工方法,完成了实验系统的搭建与测试实验的进行,主要包括以下几个方面:

(1)从机床加工运动原理着手,由直线导轨驱动刀具,完成了刀具 x 轴高频微进给,主轴 y 轴的水平移动,以及主轴的回转所形成三轴联动系统的搭建。不仅可以提高复杂球面超精密加工的加工精度和加工效率,在此基础上还提出了非球面切削中工件均匀切削量的控制方法。

(2)根据所搭建硬件系统的特征,设计了高精度非球面制造系统的软件模块,包括非球面切削加工的工件安装定位、加工轨迹规划、加工精度影响因素控制整套流程以及人机交互界面的设计。

(3)分析了超精密切削加工中误差产生的原因和规律,提出了一种补偿加工方法:从误差数据中分离出主轴长度误差、插补残差等所引起的误差,更新系统参数,将分离后剩余数据作为新的补偿误差数据进行补偿加工。

最后对系统进行了测试实验,结果表明所搭建的机构及调试的平台能够平稳有效地运动,并且达到了误差要求。本文的研究将为研制超精密加工设备,实现光学非球面元件的低成本、高效率的超精密加工提供理论支持与实践指导。

关键词: 非球面; 超精密切削; 直线电机;

Abstract

With the development of national defense industry, aerospace industry and civil optical technology, various kinds of high performance aspheric optical lens have been developed and widely used in the high performance optical systems. Compared with the spherical optical accessory, the aspheric lens can correct aberration, simplify system structure and improve the accuracy of system.. Singles-point diamond turning has become a standard machining process of producing precision optical surface requiring high geometrical accuracy together with fine surface integrity. Especially, diamond turning has found broad applications in area of axisymmetric optical surface generation, such as high-power laser reflecting mirrors and precision aspherical molding dies.

The form accuracy of aspheric surface is affected by the relative motion of work-piece and tool. To realize the ultra precision of the aspheric optics, the thesis deals with the forming principle of machining motion.

(1)It develops the linear line guide mode that a linear motor carrying the diamond tool combined with a tool servo. The tool servo synchronizes the linear movement of the cutting tool and the motion of the work-piece spindle, a complex precision aspheric surface can be generated. And paper put forward a control method to control the uniform removal quantity in wedge aspheric turning.

(2)Aiming at the machining principle of aspheric optical lens, a series of machining methods have been put forward to improve the machining accuracy and efficiency. Base on these technologies, the control system of high precision aspheric machining has been realized. The research emphases include the installation and position of aspheric work-piece in turning procedure, accuracy influence of feed speed, mathematics model and application of various aspheric surface formula and removal quantity control method.

(3)The paper put forward a machining error processing method of aspheric. The old error compensate method superpose the error data to ideal aspheric surface. However the new method builds the model to analyze the reason of error come into

being, it can act as separating the system error from machining error data, updating the spindle length data, and preparing the error compensate data. It can improve machining accuracy more.

According to the experiment, the system construction and testing platform can run steady, and to meet the needs of certain error range. It will contribute to the theory and practice guidance for developing ultra-precision machine system, and realizing manufacture of complex aspheric optics efficiently at lower cost.

Keywords: aspheric surface; ultra-precision turning; linear motor;

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 第一章 绪 论 | 1 |
| 1.1 课题研究背景 | 1 |
| 1.1.1 非球面应用 | 1 |
| 1.1.2 非球面加工方法 | 3 |
| 1.2 非球面超精密切削加工技术现状 | 6 |
| 1.2.1 非球面切削技术 | 6 |
| 1.2.2 非球面超精密切削技术现状 | 7 |
| 1.3 本课题的研究工作 | 8 |
| 第二章 高速数控非球面加工系统原理与建模 | 9 |
| 2.1 非球面面形表达方式 | 9 |
| 2.2 表面加工轨迹规划 | 12 |
| 2.2.1 工件安装及定位精度分析 | 12 |
| 2.2.2 确定最适球面 | 13 |
| 2.2.3 确定最适球面的方法 | 13 |
| 2.2.4 最小二乘法 | 14 |
| 2.2.5 非球面度和最适球面的算法 | 17 |
| 2.3 高速数控系统的建模与分析 | 24 |
| 2.3.1 音圈电机的机电耦合特性分析 | 26 |
| 2.3.2 直线进给机构的整体运动模型分析 | 27 |
| 2.3.3 进给系统的控制方法设计 | 29 |
| 2.4 工件均匀切削量控制方法 | 19 |
| 2.4.1 线速度与车削量计算模型 | 19 |
| 2.4.2 有效切削面积控制模型 | 21 |
| 2.4.3 工件均匀切削量控制模型 | 23 |
| 2.5 小结 | 26 |
| 第三章 高速数控非球面加工系统硬件设计 | 32 |
| 3.1 加工系统工作原理 | 32 |
| 3.1.1 机床的基本运动形式 | 32 |
| 3.1.2 直线进给机构的定位方式 | 33 |
| 3.2 加工系统硬件结构 | 34 |
| 3.2.1 加工系统控制方案 | 34 |
| 3.2.2 主要部件的选型 | 34 |
| 3.3 加工系统部件连接 | 39 |
| 3.4 小结 | 42 |
| 第四章 高速数控非球面加工系统软件设计 | 43 |
| 4.1 软件开发平台 | 43 |
| 4.2 系统软件设计 | 44 |

| | |
|-------------------------------------|------------------|
| 4.2.1 系统数据流分析 | 44 |
| 4.2.2 系统功能分析 | 45 |
| 4.3 功能模块设计 | 46 |
| 4.3.1 参数输入模块 | 46 |
| 4.3.2 初始加工模块 | 47 |
| 4.3.3 补偿加工模块 | 47 |
| 4.3.4 误差测量模块 | 47 |
| 4.3.5 机床通讯模块 | 48 |
| 4.4 系统软件实现 | 48 |
| 4.4.1 界面设计 | 48 |
| 4.4.2 代码实现 | 49 |
| 4.4.3 软件功能测试 | 49 |
| 4.5 小结 | 49 |
| 第五章 高速数控非球面加工系统误差分析与补偿 | 51 |
| 5.1 加工系统静态误差分析 | 51 |
| 5.2 加工系统动态误差分析 | 52 |
| 5.2.1 弹性变形对加工精度的影响 | 53 |
| 5.2.2 车削热对加工精度影响 | 53 |
| 5.3 加工误差补偿方法 | 54 |
| 5.3.1 误差补偿原理 | 54 |
| 5.3.2 补偿加工方法 | 55 |
| 5.4 小结 | 57 |
| 第六章 系统实验 | 58 |
| 6.1 PID 调节 | 58 |
| 6.2 平台运动控制实验 | 62 |
| 6.2.1 初始运动控制实验 | 64 |
| 6.2.1 补偿后的运动控制实验 | 66 |
| 6.3 小结 | 68 |
| 第七章 总结与展望 | 69 |
| 7.1 总结 | 69 |
| 7.2 展望 | 70 |
| 参考文献 | 错误！未定义书签。 |
| 致谢 | 74 |
| 硕士期间发表的论文 | 75 |

Table of Content

| | |
|--|----|
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 BackGround of Thesis | 1 |
| 1.1.1 Application of Aspheric | 1 |
| 1.1.2 Machining Method of Aspheric | 3 |
| 1.2 Survey of Ultra-Precision Aspheric Turning | 6 |
| 1.2.1 Digital Manufacturing Technology of Aspheric | 6 |
| 1.2.2 Ultra-Precision Turning Technology of Aspheric | 7 |
| 1.3 Outline of Thesis | 8 |
| Chapter 2 Principle And Modeling of High Speed NC Processing | |
| System of Aspheric Surface | 9 |
| 2.1 Expression of Aspheric Surface | 9 |
| 2.2 Processing Locus Planning of Surface | 12 |
| 2.2.1 Installation of Workpiece And Position Accuracy Analysis | 12 |
| 2.2.2 Determination of the Best Fitting Aspheric Surface of Reference | 13 |
| 2.2.3 Computational Methods of asphericity | 13 |
| 2.2.4 Algorism of Asphericity and the Best Fitting Aspheric Surface of Reference | 17 |
| 2.3 Modeling and Analysis of High-Speed NC System | 17 |
| 2.3.1 Electromechanical Coupling Characteristics Analysis of Motor | 19 |
| 2.3.2 Movement Model Analysis of Linear Movement System | 27 |
| 2.3.3 Control Method Design of Linear Movement System | 29 |
| 2.4 Control Method of Workpiece Uniform Removal Quantity | 19 |
| 2.4.1 Linear Speed Calculation Medel | 19 |
| 2.4.2 Truning Area Control Model | 21 |
| 2.4.3 Removal Quanlity Control Model | 23 |
| 2.5 Conclusions | 26 |
| Chapter 3 Hardware Design of High Speed NC Processing System of | |
| Aspheric Surface | 32 |
| 3.1 The working principle of processing system | 32 |
| 3.1.1 Basic Movement forms of processing system | 32 |
| 3.1.2 locator meams of Linear movement system | 33 |
| 3.2 Hardware Architecture of turning system | 34 |
| 3.2.1 Control method of turning system | 34 |
| 3.2.2 Main Parts Choosing | 34 |
| 3.3 Connect Method of Whole Parts | 39 |
| 3.4 Conslusions | 42 |

Chapter 4 Software Design of High Speed NC Processing System of

| | |
|---|----|
| Aspheric Surface | 43 |
| 4.1 Software Development Platform | 43 |
| 4.2 Design of System Software | 44 |
| 4.2.1 Function Analysis of Target System | 45 |
| 4.2.2 System Data-flow Ananalyzing | 44 |
| 4.3 Design of Function Module | 46 |
| 4.3.1 Parameters Entry Module | 46 |
| 4.3.2 Original processing Module | 47 |
| 4.3.3 Compensation Machining Module | 47 |
| 4.3.4 Error Measurement Module | 47 |
| 4.3.5 Machine Communication Module | 48 |
| 4.4 Realization of System Software | 48 |
| 4.4.1 Interface Design | 48 |
| 4.4.2 Code Realization | 49 |
| 4.4.3 Function Test | 49 |
| 4.5 Conslusions | 49 |

Chapter 5 Errors Analysis and Compensation of High Speed NC

| | |
|--|----|
| Processing System of Aspheric Surface | 51 |
| 5.1 Static Error Analysis of Processing System | 51 |
| 5.2 Dynamic Error Analysis of Processing System | 52 |
| 5.2.1 Influence of Elastic Deformation | 53 |
| 5.2.2 Influence of Turning Heat | 53 |
| 5.3 Error compensation method | 54 |
| 5.3.1 Principle of Error Compensation | 54 |
| 5.3.2 Approach of Error Compensation | 55 |
| 5.4 Conclusiongs | 57 |

Chapter 6 System Experiment

| | |
|--------------------------------------|----|
| 6.1 PID Turning | 58 |
| 6.2 Experiment of Movement | 62 |
| 6.2.1 Original processing Experiment | 64 |
| 6.2.1 Reprocessing Experiment | 66 |
| 6.3 Conclusions | 68 |

Chapter 7 Conclusions and Outlook

| | |
|---------------------------------|----|
| 7.1 Dissertation Summary | 69 |
| 7.2 Future Direction | 70 |

| | |
|-------------------|-----------|
| References | 错误！未定义书签。 |
|-------------------|-----------|

| | |
|------------------------------|----|
| Acknowledgement | 74 |
|------------------------------|----|

| | |
|------------------------------|----|
| Published Paper | 75 |
|------------------------------|----|

厦门大学博士论文摘要库

第一章 绪 论

1.1 课题研究背景

21 世纪可以说是“光的世纪”，光学技术在现代高科技领域无论是民用还是军事方面都有着重要的战略地位。在近十几年中，光学技术成为信息技术、远距离通信、医疗保健、生物工程、加工制造业等领域中新的有力武器，并广泛应用于国防领域，从提高武器的瞄准精度到军事侦察再到现代武器装备，光学技术的发展使这些领域取得了令人瞩目的成就。尤其是 20 世纪 60 年代研制成功的激光，更是开创了光纤通信、高密度光盘、能源以及激光手术等领域的新纪元。

光学系统的设计是光学技术的重要组成部分。由于球面镜可以通过简单的加工方法获得很高的加工精度，所以早期的光学系统大都是由多片球面镜组成。但球面镜存在像差，通过球面镜的光线不能成为同心光线。为了克服像差，在高精度光学系统中，必须采用多块球面镜的组合。而非球面的曲率是随着孔径高度而变化的，可校正球差、慧差、像散、畸变，减少光能损失，在光学系统中能够很好的矫正多种像差，获得球面光学零件所无可比拟的良好的成像质量，同时它可以一个或几个非球面零件代替多个球面零件，从而简化仪器结构，降低成本并有效地减轻仪器重量^{[1][2]}。常用的非球面光学零件有抛物面镜、双曲面镜、椭球面镜等。

1.1.1 非球面应用

由于非球面镜具有优良的光学性能，光学系统中采用非球面镜进行设计已经成为现代光学系统设计的特征，具有非球面镜的光学系统不仅在民品行业，在国防、空间科学、核能以及重要的工业领域中已经有着广泛的应用^[3]：

(1) 军事领域：

资料显示，1984~1990 年美国军用激光和红外热成像产品所需要的各种光学零件就有 114.77 万块，其中球面光学零件为 63.59 万块，非球面光学零件为 23.46 万块，平面光学零件为 18.1 万块，多面体扫描镜为 9.62 万块。以 M1 坦克为例，大约使用了 90 块透镜、30 块棱镜以及各种反射镜、窗口和激光元件。又如一副小小的 AN/AVS-6 飞行员夜视眼镜就采用了 9 块非球面光学零件和 2 块球面光学零件。

(2)光电产品:

非球面光学零件在军用和民用光电产品上的应用也很广泛,如在摄影镜头和取景器、电视摄像管、变焦镜头、电影放映镜头、卫星红外望远镜、录像机镜头、录像和录音光盘读出头、条形码读出头、光纤通信的光纤接头、医疗仪器等中。

(3)航天遥感:

航天遥感涉及到国家安全,其光学遥感器获取的是景物的光学信息,接近人类日常观察到的图像信息;以可见光波作为信息载体,获取被观测景物的基本外观信息,容易提高分辨率,且系统设计理论成熟,工程经验丰富。遥感光学系统有折射系统,反射系统和折反系统。折射系统容易实现大视场角,但宽谱段、大口径、长焦距系统受到玻璃材料和轻量化等要求的限制;折反系统参与成像面的光学表面全部为反射面;折反系统类型比较多,一般应用于焦距几米,视场在10度以内的系统中。遥感光学系统采用非球面以后,有较大的消像差能力,从而容易实现大口径,长焦距。但大部分非球面光学零件加工难,使它一直未能得到广泛应用。进入20世纪60年代以后,非球面光学零件才得到广泛应用。如美国的KH-11军事照相侦察卫星中的空间遥感相机使用非球面离轴三反消像散系统,地面分辨率GSD达0.15m。

(4)天文望远镜:

大型天文望远镜非球面主镜的发展趋势是:整体主镜的大型化、轻量化、薄型化、柔性化、深型短筒长化和子口径拼接化。在国际上有四种方法或者流派:美国的硼酸盐玻璃轻质镜熔铸成型;美国的超低膨胀熔石英玻璃焊接成型;德国零膨胀玻璃薄型镜直接熔铸与微晶化薄镜成型;德国零膨胀玻璃镜胚机械加工减重成型。

20世纪末到跨入新世纪,有代表性的世界大型天文望远镜有:①欧洲南方天文台的ESO VLT超大型望远镜,由四架分立的口径8.4m望远镜集成,采用主镜整体零膨胀玻璃柔性薄镜和能动支撑技术;②美国的大型“双筒”望远镜LBT2×8.4m望远镜建在同一基座上,主镜整体离心熔铸硼酸盐玻璃轻质镜,由Arizona大学大镜实验室用应力盘技术抛光;③美国的Keck I, Keck II口径10m望远镜,采用了Nelson发明的应力加工技术,10m口径由36个六角形子镜拼接技术;④中国南京的大空域多目标光线光谱望远镜(LAMOST)计划也得到了国际天文界

广发关注，建成后将成为世界上最大的反射式斯密特望远镜。

(5) 医疗领域：

光学技术被广泛应用在医疗上，特别是在眼镜、透镜和接触镜方面。白内障摘除及人工晶体状体植入术是目前治疗白内障最有效的方法之一。由于传统的球面 IOL 具有正球面像差，在白内障术后植入球面 IOL 后，其视功能并不会较一个拥有透明晶状体的老年人有所提高。其术后客观视力好，但夜视力差、眩光、视物变色等。球差是植入球面人工晶状体后影响白内障术后患者视功能的主要原因。而非球面 IOL 正是在这样的背景之下应运而生。光学在未来医疗上将发挥更加重要的作用，将采用更加复杂的光学系统和技术以满足医疗的要求。

1.1.2 非球面加工方法

目前，由于非球面镜能提高光学系统性能的有着十分重要的作用，且其在军事、航天领域上应用广泛，因此非球面加工作为超精密加工领域中的一个关键性技术难题，各国都大力支持该方面研究。从 70 年代开始，以红外热成像和高能激光为代表的军用光学技术迅速发展。军用光学系统不但要求成像质量好，而且要求体积小、重量轻、结构简单。这对光学加工行业是一个严峻考验。为了跟上时代发展的步伐，设计和制作出质地优良的光学成像系统，80 年代以后，光学零件加工行业研究开发出许多新的光学零件加工方法，主要有：计算机数控单点金刚石车削技术、计算机数控磨削技术、计算机数控离子束成形技术、计算机数控超精密抛光技术和非球面复印技术等，这些加工方法，基本上解决了各种非球面镜加工中所存在的问题。前四种方法运用了数控技术，均具有加工精度较高，效率高等特点，适合批量生产。

进行非球面零件加工时，要考虑所加工零件的材料、形状、精度和口径等因素，对于铜、铝等软质材料，可以用单点金刚石切削的方法进行超精密加工，对于其他一些高硬度的脆性材料，目前主要是通过超精密磨削和超精密研磨、抛光等方法进行加工的，另外，还有非球面零件的特种加工技术，如离子束抛光等，下面将重点介绍几种常用的非球面加工方法：

(1) 非球面零件的超精密抛光(研磨)技术

超精密抛光是加工速度极慢的一种加工方法。不适合形状范成法加工，近年来，光学系统的飞速发展对零件的表面粗糙度提出了更高的要求，到目前为止还

没有比超精密抛光更好的实用的方法, 尤其当零件的表面粗糙度要求优于 $0.01 \mu\text{m}$ 时, 这种方法是不可缺少的。对形状精度要求很高的工件, 如果采用强制进给的方法进行切削或研磨时, 其形状精度将直接受到机床进给定位精度的影响, 在工件表面上存在同样微小凹的部分, 在一般情况下, 只能获得波纹起伏较大的表面^[4]。

对非球面光学零件进行精密研磨抛光时普遍采用的一种技术是小型磨床修正研磨抛光。小型磨床最早是由美国研究开发的, 其磨头直径不超过工件的 $1/3$, 由计算机计算去除量, 加工精度比较高。

为了提高加工精度, 小型磨床加工系统必需具备很高的精度与反复再现性, 研磨去除量不随时间变化而变化、高精度的模拟计算和与实际研磨的一致性 conditions。小型磨床研磨抛光加工的工艺流程大致如下: 首先由三维测试机、激光干涉仪测出加工面的形状精度, 求出面形误差。然后工作站根据面形误差计算出需要研磨抛光的轨迹, 并将该研磨抛光轨迹转换成数控编码传送给磨床进行加工。加工完了后进行面形精度测试。面形精度若是没有达到要求, 再反复地进行计算、加工。通过这样反复的进行面形测试、计算、修正研磨抛光, 即可达到提高面形精度的目的^[5]。

(2) 非球面零件复制技术

用控制除去厚度的抛光(研磨)方法能够制造出高精度的非球面零件, 但和一般的光学零件加工方法相比, 这种方法的加工效率很低, 解决这个问题可以利用复制技术, 即塑料注射成形和玻璃的模压成形技术, 这种技术能够制造一部分非球面透镜^[6]。

光学塑料注射成形技术主要用来大量生产直径 100mm 以下的非球面光学零件, 也可制造微型透镜阵列。塑料透镜注射成形是将熔化的树脂注入模具内, 一边施加压力, 一边冷却固化的加工方法, 这种方法能够进行廉价、大批量生产。塑料非球面光学零件具有重量轻、成本低等优点; 光学零件和安装部件可以注塑成为一个整体, 具有节省装备工作量, 耐冲击性能好等优点。但塑料自身存在某些问题, 如温升大, 吸湿导致透镜折射率的改变。

玻璃的模压成形是代替切削、磨削、研磨加工透镜、棱镜的最佳的小型零件大批量生产方法。该技术可用于制造直径为 100mm 以上的非球面透镜光学零件。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库